



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2070418.2014



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Laboratory Study of CO₂ Removal from Gas Mixture Using Membrane Contactor Technology

Parya Amirabedi^{1*}

¹ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

Received: 31 Aug 2025

Accepted: 2 Nov 2025

Abstract

Membrane contactors are one of the effective technologies for reducing CO₂ emissions in the environment. Accordingly, in the present study, membrane contactors containing polyvinyl chloride/calcium carbonate membranes were fabricated to remove CO₂ from a gaseous feed with a composition similar to the flue gas composition of a reference cement plant. The average results of contact angle measurements for pure and nanocomposite membranes were 78° and 92°, respectively, indicating an increase in the hydrophobicity of the membranes due to the presence of nanoparticles. Also, the results showed that increasing the gas velocity had a negative effect on the absorption efficiency, but on the contrary, increasing the operating pressure and absorbent velocity increased the absorption efficiency. In addition, analysis of the CO₂ absorption results showed that at an absorbent velocity of (200 ml/min), the nanocomposite membrane had the highest CO₂ absorption efficiency (88%) and the highest absorption flux (2.17×10^{-3} mol/m²s).

Keyword: CO₂, Cement Plant, Membrane Contactors, Absorption Efficiency

* p.amirabedi@bkatu.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Amirabedi, P., "Laboratory Study of CO₂ Removal from Gas Mixture Using Membrane Contactor Technology", Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 91, pp. 21-36, In Persian, (2025).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2070418.2014



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

مطالعه آزمایشگاهی حذف CO₂ از مخلوط گازی با استفاده از فناوری تماس دهنده‌های غشایی

پریا امیرعابدی^{*1}

¹ گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران

دریافت: 1404/06/09 پذیرش: 1404/08/11

چکیده

تماس دهنده‌های غشایی یکی از فناوری‌های موثر در جهت کاهش آلودگی‌های حاصل از انتشار CO₂ در محیط‌زیست هستند. بر این اساس در پژوهش حاضر، تماس دهنده‌های غشایی حاوی غشاهای پلی‌ونیل کلراید/کربنات کلسیم، جهت حذف CO₂ از خوراک گازی با ترکیبی مشابه با ترکیب درصد گاز دودکش یک کارخانه سیمان مرجع ساخته شدند. میانگین نتایج حاصل از اندازه‌گیری زاویه تماس غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی به ترتیب 78° و 92° بدست آمد که حاکی از افزایش قدرت آبگریزی غشاها به دلیل حضور نانوذرات بود. همچنین، نتایج نشان داد که افزایش سرعت گاز تأثیر منفی بر روی بازده جذب داشته، ولی در مقابل، افزایش فشار عملیاتی و سرعت جاذب بازده جذب را افزایش دادند. بعلاوه، تحلیل نتایج حاصل از جذب CO₂ نشان داد که در سرعت جاذب (200 ml/min)، غشای نانوکامپوزیتی بیشترین بازده جذب CO₂ (88%) و بیشترین شار جذب ($2/17 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2\text{s}$) را دارا می‌باشد.

کلمات کلیدی: CO₂، کارخانه سیمان، تماس دهنده‌های غشایی، بازده جذب

* p.amirabedi@bkatu.ac.ir

1- مقدمه

تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی در نتیجه فعالیت‌های انسانی رخ می‌دهد که مهم‌ترین دلیل آن گسترش فعالیت‌های صنعتی است [1]. امروزه سیاست‌های انرژی و اقلیمی برای کاهش انتشار CO₂ و مبارزه با تغییرات اقلیمی اتخاذ شده است، که هدف آن کاهش 40 درصدی تا سال 2030 و 80 تا 95 درصدی تا سال 2050 در مقایسه با سال 1990 است [2].

آژانس بین‌المللی انرژی اعلام کرده است که صنعت سیمان یکی از بزرگترین منابع انتشار CO₂ ناشی از فعالیت‌های انسانی است که حدود 7 درصد از کل سهم انتشار CO₂ را به خود اختصاص داده و تقریباً 2/2 گیگاتن CO₂ در سال آزاد می‌کند. حدود دو سوم از انتشار CO₂ در صنعت سیمان مربوط به فرآیندی است که از کلسیناسیون سنگ آهک که در آن CaCO₃ به CaO و CO₂ (CaCO₃ ⇌ CaO + CO₂) تبدیل می‌شود، ناشی می‌گردد. این در حالی است که، یک سوم از انتشار CO₂ از احتراق سوخت‌ها در کلسینه کننده و کوره دوار، ناشی می‌شود [3, 4].

مطالعات نشان می‌دهد که تاکنون، فرایندهایی همچون استفاده از سوخت‌های جایگزین و استفاده از فناوری‌های جذب و استفاده از کربن² برای کاهش انتشار CO₂ در کارخانه‌های سیمان، بکار برده شده است. از سوی دیگر باید توجه داشت که، اقدامی مانند تغییر سوخت یک کارخانه سیمان، می‌تواند تنها یک سوم انتشار CO₂ را کاهش دهد؛ زیرا همانطوریکه گفته شد، تنها یک سوم از انتشار CO₂ از احتراق سوخت‌ها ناشی می‌گردد. در این میان، فرایند جذب و استفاده از کربن، می‌تواند هم انتشار CO₂ ناشی از فرآیند و هم ناشی از احتراق سوخت را به طور قابل توجهی کاهش دهد. بدین ترتیب، این روش به عنوان مهم‌ترین روشی که بیشترین پتانسیل را برای کاهش انتشار CO₂ در صنعت سیمان دارد، شناخته شده است [4].

از جمله فناوری‌های جذب CO₂ می‌توان به فرایند جذب شیمیایی با آمین³ [5-8]، فرایند حلقه کلسیم⁴ [9-11]، فرایند سوخت اکسیژنی⁵ [12]، فرایند آمونیاک سرد⁶ [4] و فرایندهای غشایی⁷ [2, 13] اشاره کرد. در این میان، فرایندهای غشایی به عنوان یکی از جدیدترین و در عین حال پربازده‌ترین روش‌های جذب CO₂ محسوب می‌شوند. فرایندهای غشایی مختلفی در زمینه جذب CO₂ وجود دارد که در این میان فناوری تماس‌دهنده‌های غشایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند.

تماس‌دهنده‌های غشایی دسته‌ای از تجهیزات غشایی هستند که فاز گاز و مایع را بدون اینکه در یکدیگر پراکنده شوند، در تماس با یکدیگر قرار می‌دهند. فاز مایع به عنوان جاذب در یک سمت غشا و فاز گاز در سمت دیگر آن جریان دارد و سطح تماس مایع و گاز در دهانه حفرات غشا تشکیل می‌شود. در تماس‌دهنده‌های غشایی، جریان‌های گاز و مایع مستقل از یکدیگرند و براحتی می‌توان به یک عملیات انعطاف‌پذیر، بدون مشکلات ماندگی، طغیان، نشت

¹ IEA - International Energy Agency

² Carbon Capture and Utilization (CCU)

³ Amine-Based CO₂ Capture

⁴ Calcium Looping (Cal)

⁵ Oxyfuel Process

⁶ Chilled Ammonia Process (CAP)

⁷ Membrane Technology

کردن و کفزائی دست یافت. از سوی دیگر این تجهیزات سطح ویژه بسیار بالا، مشخص و ثابتی دارند و جایگزین مناسبی برای دستگاه‌های سنتی جذب CO_2 و راه حلی در جهت غلبه بر معایب آن‌ها هستند [14-16].

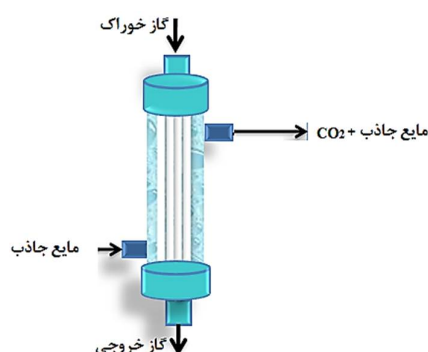
در شکل 1 نمایی از یک تماس‌دهنده غشایی آورده شده است. فرایند انتقال جرم در تماس دهنده‌های غشایی شامل سه مرحله اصلی است که عبارتند از:

- انتقال گاز حل شده از میان توده فاز گاز تا سطح غشا

- انتقال گاز از میان حفره‌های غشا

- انتقال از سطح مشترک مایع-غشا به داخل توده مایع

بدین ترتیب می‌توان دریافت که خیس شدن حفرات غشا توسط مایع جاذب، می‌تواند به طور قابل توجهی میزان شار جذب CO_2 را کاهش دهد.



شکل 1- شماتیک فرایند انتقال جرم در یک تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی گاز-مایع

در یک کار تحقیقی توسط لی و همکاران، از فناوری تماس‌دهنده‌های غشایی برای جذب CO_2 خروجی از گاز دودکش یک نیروگاه زغال‌سنگ استفاده شد. در این تحقیق از غشاهای متخلخل پلی اتر اتر کتون (PEEK)، که سطح آن‌ها با یک الیگومر پرفلورو اصلاح شده بود، استفاده شد. همچنین مایع جاذب مورد استفاده در تماس‌دهنده‌های غشایی متیل‌دی‌اتانول آمین بود. نتایج حاکی از احیا موفقیت آمیز مایع جاذب و خروج CO_2 از داخل آن بود [17].

در یک کار تحقیقی مشابه، اسکولس⁸ و همکاران یک آزمایش موفق را با استفاده فناوری تماس‌دهنده‌های غشایی برای جذب CO_2 خروجی از گاز دودکش یک نیروگاه زغال‌سنگ واقع در استرالیا، انجام دادند. غشاهای مورد استفاده به شکل غشاهای الیاف توخالی متخلخل پلی‌سولفونی بودند که لایه‌ای از پلی دی‌متیل‌سیلوکسان غیرمتخلخل بر روی آن‌ها کشیده شده بود. همچنین از مونواتانول آمین با 30 درصد وزنی به عنوان مایع جاذب برای جذب CO_2 استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که فناوری به کار برده شده، امکان بازیابی بیش از 90 درصد CO_2 موجود در گاز دودکش را دارا می‌باشد [18].

مطالعات نشان می‌دهد که به‌ازای یک مایع جاذب مشخص، مهم‌ترین متغیری که قابلیت عملکرد تماس‌دهنده‌های غشایی را تعیین می‌کند خصوصیات غشای استفاده شده در ساختار آن است. در این میان، غشاهایی با انرژی سطحی پایین و زبری بالای سطح به عنوان غشاهای مناسب در تماس‌دهنده‌های غشایی بکار برده می‌شوند. زیرا که این غشاهای تمایل کمتری برای خیس شدن که یکی از مشکلات اساسی تماس‌دهنده‌های غشایی است، از خود نشان می‌دهند [19, 20].

⁸ Scholes

مطالعات نشان می‌دهد پلی‌ونیل‌کلراید (PVC) به دلیل قیمت کم، مقاومت مکانیکی، شیمیایی و حرارتی خوب، انعطاف‌پذیری بالا، حل‌پذیری در حلال‌های پرکاربرد، در دسترس بودن و ساخت آن در داخل کشور، به عنوان یک پلیمر مناسب برای تولید غشا محسوب می‌شود. علی‌رغم مزایای فراوان غشای PVC، یکی از مشکلات اساسی این نوع غشاها در تماس دهنده‌های غشایی، پدیده خیس‌شدگی غشا می‌باشد که باعث افت شار جذب CO_2 می‌گردد. از این رو، بهبود آبریزی سطح غشای PVC می‌تواند مشکل خیس‌شوندگی آن را تا حد زیادی کاهش دهد [21-23]. روش‌های متعددی جهت افزایش قدرت آبریزی سطح غشاها وجود دارد که استفاده از نانوذرات معدنی آبریز در ساختار غشا و تولید غشاهای نانوکامپوزیتی یکی از مهم‌ترین این روش‌ها است [24, 25]. در این میان، نانوذرات CaCO_3 از جمله نانوذرات مهم معدنی هستند که در سال‌های اخیر کاربردهای فراوانی در بسیاری از علوم یافته‌اند. این نانوذرات غیرسمی، کم‌هزینه، در دسترس، زیست‌سازگارند و مقاومت گرمایی زیادی دارند [26, 27].

صنعت سیمان در ایران طی سال‌های اخیر به خاطر نیاز به سیمان برای اجرای پروژه‌های عمرانی، فراهم بودن زمینه‌ی صادرات سیمان به کشورهای همسایه و وجود مواد اولیه این صنعت در کشور، رشد چشمگیری داشته است. با عنایت به اینکه گاز خروجی از دودکش کارخانه‌ها و از جمله کارخانه‌های سیمان، یکی از مهمترین منابع انتشار CO_2 است، مطالعه و پژوهش در زمینه حذف CO_2 خروجی از گاز دودکش این کارخانه‌ها، امری ضروری به نظر می‌رسد.

به دلیل تلاش جهت بومی‌سازی فناوری تماس‌دهنده‌های غشایی در ایران و با عنایت به تولید انبوه پلیمر PVC و نانوذرات CaCO_3 در کشور، در پژوهش حاضر به بررسی یک تماس‌دهنده غشایی حاوی غشاهای PVC/CaCO_3 جهت حذف CO_2 از خوراک گازی با ترکیبی مشابه با ترکیب درصد گاز دودکش یک کارخانه سیمان مرجع پرداخته شد. شایان ذکر است که این پژوهش، نخستین کاربرد تماس‌دهنده‌های غشایی حاوی غشاهای PVC/CaCO_3 در زمینه حذف CO_2 از خوراک گازی با ترکیبی مشابه با ترکیب درصد گاز دودکش یک کارخانه سیمان مرجع را نشان می‌دهد.

2- مواد و روش‌ها

1-2- مواد

PVC (Bulk density=530- 590 (g/lit)) از شرکت پتروشیمی غدیر تهیه شد. نانوذرات CaCO_3 (M=100.09) و دی‌متیل‌فرمامید (DMF) (M=73.09 g/mol, 15-40 nm) از شرکت نانومواد ایرانیان خریداری شدند.

2-2- ساخت غشای الیاف توخالی

برای تهیه غشای الیاف توخالی نانوکامپوزیتی، در ابتدا مقادیر مورد نیاز از PVC، DMF و نانوذرات CaCO_3 که در جدول 1 آورده شده است، از طریق ترازو وزن شدند. سپس بخشی از حلال (حدود 75% از آن) در یک ظرف شیشه‌ای ریخته شده و PVC مورد نیاز به آن اضافه گردید. به منظور همزدن مواد، از یک عدد مگنت استفاده شد. از سوی دیگر، جهت افزایش سرعت همگن شدن، ظرف حاوی محلول در یک حمام روغن با دمای 50°C قرار گرفت. تقریباً 24 ساعت طول کشید تا محلولی شفاف حاصل گردد. پس از این مرحله، نانوذرات مورد نیاز در داخل حلال باقیمانده ریخته شده و به مدت یک ساعت به کمک امواج فرا صوت در آن پخش شدند. سپس محلول حاصل به صورت قطره قطره به محلول قبلی اضافه شد. محلول بدست آمده به مدت یک ساعت در دمای محیط قرار گرفت تا

هواگیری از آن صورت پذیرد. در ادامه، این محلول درون مخزن دستگاه ساخت غشای الیاف توخالی ریخته شده و در حدود یک ساعت زمان داده شد تا عمل هواگیری در آن تکمیل گردد. سپس، مرحله ساخت غشا شروع شده و محلول پلیمری بصورت غشاهای الیاف توخالی از دستگاه خارج شد. به منظور انجام فرایند جدایش فازی، محلول خارج شده مستقیماً وارد حمام آبی گردید که در دمای محیط بود. جهت خارج شدن حلال باقی مانده، غشاهای تولید شده به مدت چهار شبانه روز در حمام آب قرار گرفتند و آب آنها هر روز تعویض شد. پس از آن، غشاها در دمای محیط خشک شدند. در جدول 1 شرایط کلی، جهت تهیه غشاهای الیاف توخالی آورده شده است. همچنین در شکل 2 تصویری از فرایند ساخت غشای الیاف توخالی آورده شده است.



شکل 2- تصویری از فرایند ساخت غشای الیاف توخالی

جدول 1- شرایط تولید غشاهای الیاف توخالی PVC

مقادیر	شرایط تولید
12 درصد وزنی	پلیمر + نانوذرات
2 درصد وزنی از کل جامد	نانوذرات
آب	سیال سوراخ کننده
2 (ml/min)	شدت جریان سیال سوراخ کننده
1 cm	فاصله هوایی
15 (mm/min)	سرعت ریسیدن
آب	حمام انعقاد
25 (°C)	دمای حمام انعقاد

3-2- آزمون میکروسکوپ الکترونیکی (SEM)

برای ارزیابی ساختاری غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی از دستگاه SEM با مدل ZEISS EVO18 استفاده شد. برای انجام این آزمون، در ابتدا سطح نمونه‌ها با لایه‌ای نازک از طلا پوشش داده شده و سپس تصاویر SEM از سطح رویی و سطح مقطع غشاها تهیه گردید.

4-2- آزمون طیف سنجی مادون قرمز FTIR

برای بررسی ساختار شیمیایی غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی از آزمون FTIR استفاده گردید. این آزمون توسط دستگاهی با مدل FTIR-4600 ساخت شرکت Jasco ژاپن در محدوده عدد موجی $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ صورت گرفت.

5-2- آزمون زاویه تماس

قدرت آبگریزی غشاهای تولید شده، توسط آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس تعیین گردید. برای این منظور از دستگاهی با مدل CAG-20 Jikan استفاده شد. برای انجام این آزمون، از نمونه غشاهای تختی که با همان ترکیب درصد غشاهای الیاف توخالی تولید شده بودند، استفاده شد. برای افزایش دقت نتایج بدست آمده، هر نمونه سه بار مورد آزمون قرار گرفته و میانگین نتایج بدست آمده گزارش گردید.

2-6- آزمون میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

تصاویر AFM غشاهای تختی که با همان ترکیب درصد غشاهای الیاف توخالی تولید شده بودند، با استفاده از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی مدل Nanosurf Mobile S ساخت شرکت Nanosurf مورد مطالعه قرار گرفت.

2-7- آزمون نفوذ گاز (تعیین تخلخل سطحی مؤثر و اندازه متوسط حفرات)

میانگین اندازه حفرات و تخلخل سطحی مؤثر غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی به روش آزمایش نفوذ گاز به دست آمد. در این آزمایش، دو عدد سامانه تماس دهنده غشایی که هر یک حاوی یک فیبر با طول مؤثر 18 سانتی متر بود، تهیه شد. گاز نیتروژن به سمت پوسته مازول وارد شد و شار نفوذ N_2 در سمت لوله با استفاده از یک فلومتر در فشارهای مختلف تعیین شد. از مدل نفوذ گاز برای دستیابی به تخلخل سطحی مؤثر و اندازه متوسط منافذ با استفاده از معادلات زیر استفاده شد:

$$P = P_p + P_K = \frac{2}{3} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} \frac{r_{p,m} \xi}{RT l_p} + \frac{1}{8\mu} \frac{r_{p,m}^2 \xi}{RT l_p} P_m \quad (1)$$

$$P = B + S P_m \quad (2)$$

که در آن P تراوایی کل گاز ($\text{mol/ m}^2\text{Pas}$)، P_p و P_K به ترتیب تراوایی گاز بر اساس رژیم‌های جریان پوازوی (Poiseuille) و نادسن (Knudsen) ($\text{mol/ m}^2\text{Pas}$)، R ثابت جهانی گاز، T دمای مطلق (K)، M وزن مولکولی گاز (kg/mol)، $r_{p,m}$ شعاع متوسط منافذ غشا (m)، μ ویسکوزیته گاز (Pa s)، ξ تخلخل سطح غشا، l_p طول مؤثر منافذ (m) و P_m فشار متوسط (Pa) است. از نمودار خطی بین P و P_m می‌توان شیب (S) و عرض از مبدا (B) را محاسبه کرد و بنابراین می‌توان اندازه متوسط حفرات و تخلخل سطحی مؤثر را از طریق معادله (3) و (4) بدست آورد [28].

$$r_{p,m} = \frac{16 b}{3 a} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} \mu \quad (3)$$

$$\frac{\xi}{l_p} = \frac{8\mu RT b}{r_{p,m}^2} \quad (4)$$

2-8- جداسازی CO_2

به منظور جداسازی CO_2 ، خوراک گازی با ترکیبی مشابه با ترکیب درصد گاز دودکش یک کارخانه سیمان مرجع، به داخل غشاهای الیاف توخالی تزریق شد تا اثر سرعت گاز، سرعت جاذب و فشار عملیاتی بر روی میزان جذب CO_2 مورد بررسی قرار گیرد. کارخانه سیمان مرجع، یک کارخانه با بهترین فناوری موجود است که توسط سازمان تحقیقات سیمان اروپا¹ و پروژه استحصال CO_2 از کارخانه‌های تولید سیمان¹، تصویب شده است. این کارخانه بر اساس فرآیند کوره خشک، متشکل از یک پیش‌گرمکن سیکلون پنج مرحله‌ای، کلسینه کننده با مجرای هوای ثالثیه²، کوره دوار و خنک کننده است. مهمترین ویژگی‌های این کارخانه در جدول 2 آورده شده است. با دقت در این جدول می‌توان

⁹ Best Available Technique (BAT)

¹ European Cement Research Academy (ECRA) 0

¹ CO₂ capture from cement production” (CEMCAP) 1

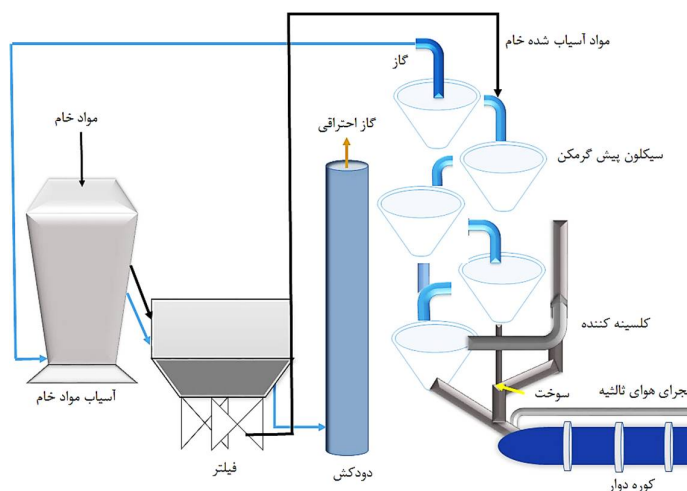
¹ Tertiary air duct 2

دریات که این کارخانه ظرفیت تولید 3 کیلو تن کلینکر^۳ در روز را دارد که معادل حدود 1 میلیون تن کلینکر در سال یا 1/4 میلیون تن سیمان در سال با زمان کارکرد بیش از 330 روز در سال است [4].

جدول 2- ویژگی‌های کارخانه سیمان مرجع

مقدار	پارامتر
3000 t/day	تولید کلینکر
0/737	فاکتور کلینکر/ سیمان
1/6	فاکتور مواد خام/ کلینکر
850 Kg/tcl	انتشار CO ₂ ویژه
97 kWh/tcement	مصرف قدرت الکتریکی ویژه

خط پخت کلینکر کارخانه سیمان مرجع، در شکل 3 نشان داده شده است. همچنین شرایط گاز دودکش این کارخانه در طول نیمه اول سال در جدول 3 آورده شده است.



شکل 3- شمایی از خط پخت کلینکر یک کارخانه سیمان مرجع

جدول 3- شرایط گاز احتراقی خروجی از دودکش

مقدار در نیمه اول سال	شرایط گاز احتراقی خروجی از دودکش
318192 kg/h	شدت جریان کلی
130 C°	دما
	ترکیب درصد مولی (بر مبنای مرطوب)
0/22	CO ₂
0/60	N ₂
0/07	O ₂
0/11	H ₂ O
591 (mg/Nm ³)	NO _x (بر مبنای خشک)
236 (mg/Nm ³)	SO _x (بر مبنای خشک)

9-2- نحوه کاربرد فناوری تماس دهنده‌های غشایی جهت جذب CO₂

در این سری از آزمایشات، از خوراک گازی با ترکیبی مشابه با ترکیب درصد گاز دودکش یک کارخانه سیمان مرجع، که در جدول 3 آورده شده است، استفاده شد. مشخصات سامانه تماس دهنده غشایی در جدول 4 آورده شده است. گازهای خروجی از تماس دهنده غشایی، با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) مدل 8860 ساخت شرکت AGILENT مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. همچنین، با استفاده از رابطه 5 بازده جذب محاسبه شد [29]:

$$\epsilon = \left[1 - \left(\frac{y_{CO_2, out}}{1 - y_{CO_2, out}} \right) \left(\frac{1 - y_{CO_2, in}}{y_{CO_2, in}} \right) \right] \times 100 \quad (5)$$

که در آن ϵ بازده جذب CO₂، $y_{CO_2, in}$ و $y_{CO_2, out}$ به ترتیب جزء مولی CO₂ در گاز ورودی و گاز خروجی است. شار جذب CO₂ نیز با استفاده از معادله 6 محاسبه گردید:

$$CO_2 \text{ flux} = \frac{Q_{feed} \times y_{CO_2, in} \times \epsilon}{A} \quad (6)$$

که در آن Q_{feed} نرخ خوراک ورودی (mol/s) و A سطح انتقال جرم (سطح خارجی غشا) (m²) است.

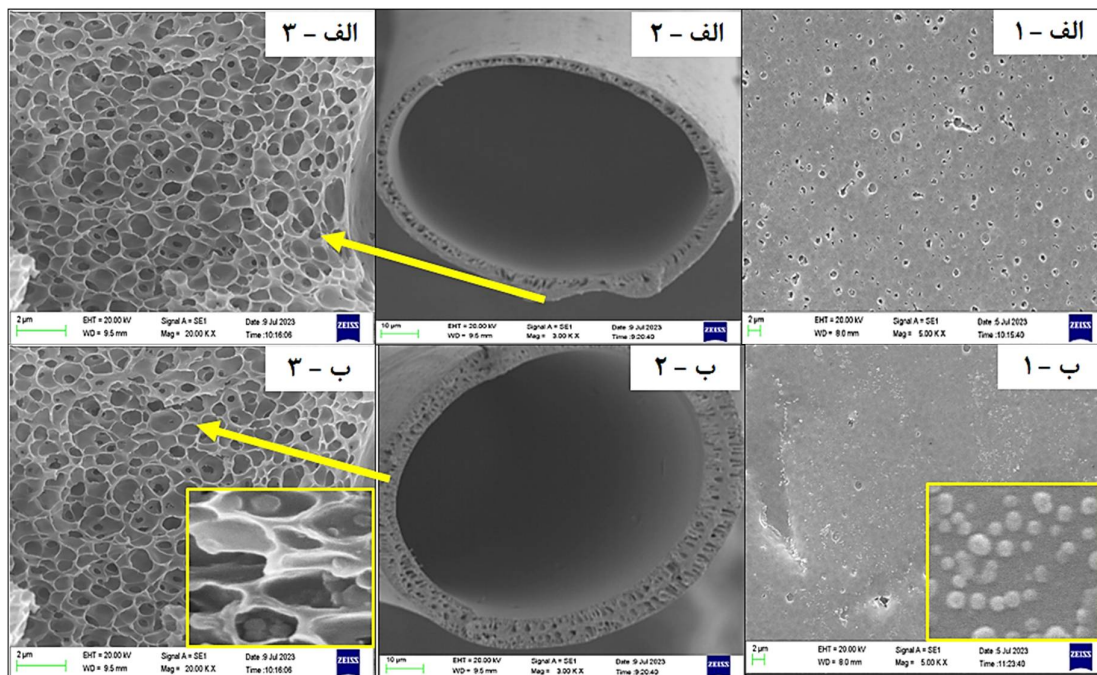
جدول 4- مشخصات سامانه تماس دهنده غشایی

مقادیر	مشخصات
10	قطر داخلی مدول (mm)
24	طول مدول (cm)
0/8	قطر خارجی الیاف (mm)
0/6	قطر داخلی الیاف (mm)
18	طول موثر الیاف (cm)
10	تعداد الیاف

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ساختار غشاها

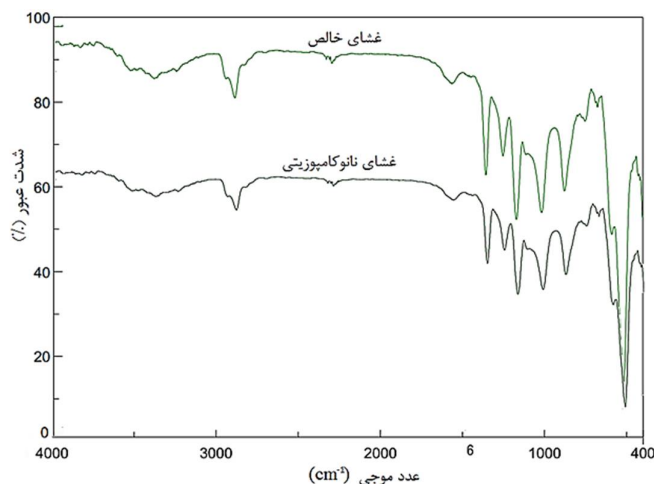
شکل 4 نشان‌دهنده تصاویر SEM مربوط به سطح مقطع و سطح رویی غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی است. همانطوریکه از شکل می‌توان دریافت، تمامی غشاها دارای ساختار سلولی می‌باشند. همچنین، این تصاویر وجود نانوذرات را در ساختار داخلی و سطح رویی غشاهای نانوکامپوزیتی تأیید می‌کنند. نکته دیگری که با دقت در شکل می‌توان دریافت، این است که اگر چه توزیع یکنواخت اندازه نانوذرات برای ما امری مطلوب می‌باشد ولی در مورد غشاهای نانوکامپوزیتی، گستردگی در توزیع اندازه نانوذرات منجر به افزایش زبری سطح شده که در نتیجه آن اندازه زاویه تماس افزایش خواهد یافت. نتایج بدست آمده از آزمون AFM مؤید این مطلب است که در ادامه به آن پرداخته شده است.



شکل 4- تصاویر SEM مربوط به (الف) غشای PVC خالص، (ب) غشای PVC نانوکامپوزیتی؛ (1) سطح رویی و (2 و 3) سطح مقطع غشاها

3-2-آزمون FTIR

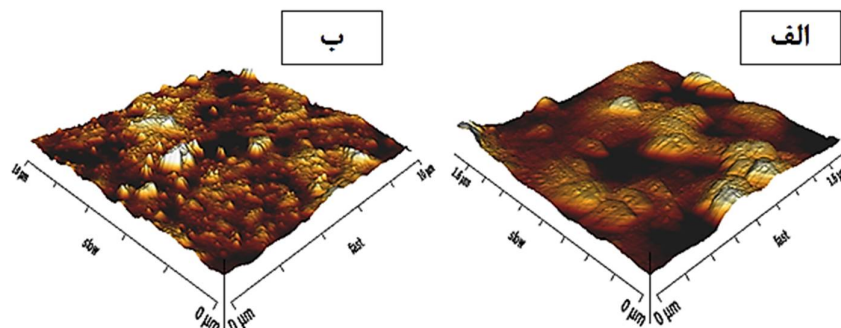
طیف‌های FTIR مربوط به غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی در شکل 5 نشان داده شده است. در طیف‌های مربوط به هر دو نوع غشا، پیک جذب در محدوده $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ به ارتعاش کششی پیوند C-H مربوط است. پیک جذب در طول موج‌های بزرگ‌تر این محدوده به ارتعاش کششی نامتقارن C-H و پیک جذب در طول موج‌های کوچک‌تر آن به ارتعاش کششی متقارن C-H نسبت داده می‌شود. پیک در نزدیکی 1400 cm^{-1} مربوط به نوار خمشی C-H آلیفاتیک است. نوار کششی پیوند C-C زنجیر اصلی PVC در محدوده $1100-1000\text{ cm}^{-1}$ دیده می‌شود. در نهایت، پیک در محدوده $650-600\text{ cm}^{-1}$ به پیوند C-Cl مربوط بوده که از ویژگی‌های PVC است. نتایج نشان می‌دهد که شکل طیف‌های مربوط به غشای خالص و نانوکامپوزیتی مشابه به هم بوده و فقط شدت پیک‌ها در غشای نانوکامپوزیتی نسبت به غشای خالص تغییر یافته است. بدین ترتیب می‌توان گفت که اجزای نانوذرات CaCO_3 به شکل سازگار در ساختار غشای نانوکامپوزیتی قرار دارند.



شکل 5- طیف‌های FTIR مربوط به غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی

3-3- بررسی زاویه تماس و میکروسکوپ نیروی اتمی

میانگین نتایج حاصل از اندازه‌گیری زاویه تماس غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی به ترتیب 78° و 92° بدست آمد. یکی از دلایل اصلی افزایش اندازه زاویه تماس غشاهای نانوکامپوزیتی افزایش زبری سطح این نوع غشاها به واسطه وجود نانوذرات است که به منظور بررسی اثر زبری، از آزمون AFM استفاده گردید (شکل 6). با دقت در شکل می‌توان دریافت که وجود نانوذرات بر روی سطح غشاهای نانوکامپوزیتی موجب افزایش زبری سطح غشا شده و با افزایش زبری سطح، اندازه زاویه تماس افزایش یافته است.



شکل 6- تصاویر AFM مربوط به (الف) غشای PVC خالص و (ب) غشای نانوکامپوزیتی

3-4- جداسازی CO₂

به منظور جداسازی CO₂، خوراک گازی با ترکیبی مشابه با ترکیب درصد گاز دودکش یک کارخانه سیمان مرجع، به داخل غشاهای الیاف توخالی تزریق شد تا اثر سرعت گاز، سرعت جاذب و فشار عملیاتی بر روی میزان جذب CO₂ مورد بررسی قرار گیرد. لازم به ذکر است که انتخاب بازه عملیاتی پارامترهای ذکر شده بر اساس مقادیر موجود در مراجع صورت گرفت [30, 31].

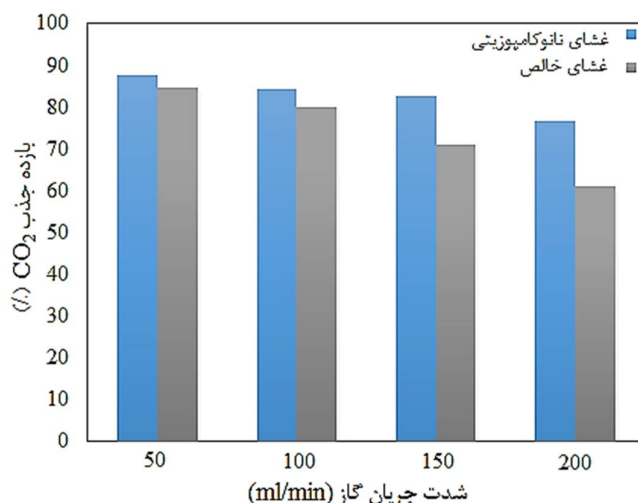
3-4-1- بررسی اثر سرعت گاز

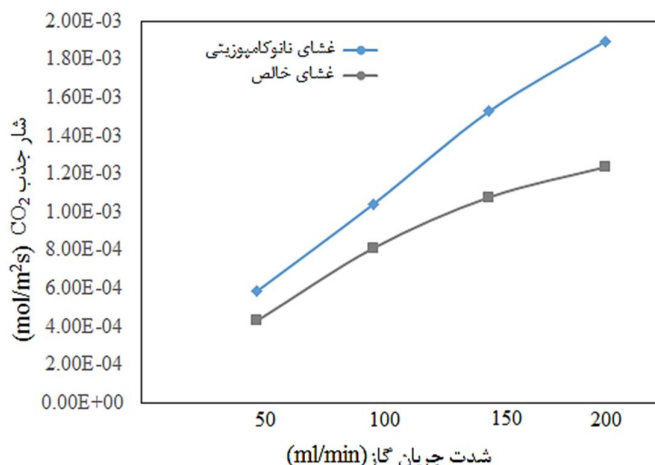
شکل 7 اثر دبی گاز ورودی را بر روی بازده جذب CO₂ و شکل 8 اثر این پارامتر را بر روی شار جذب CO₂ نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده حاکی از بالا بودن بازده جذب و شار عبوری غشاهای نانوکامپوزیتی نسبت به غشاهای

خالص است. دلیل این امر را می‌توان به تخلخل سطحی متوسط بالا و اندازه حفرات کوچکتر غشای نانوکامپوزیتی نسبت به غشای خالص نسبت داد (جدول 5). همچنین، با دقت در شکل 7 می‌توان دریافت که با افزایش سرعت گاز، بازده جذب کاهش یافته است. در این مورد، کاهش مدت زمان اقامت فاز گاز در داخل تماس‌دهنده غشایی عامل اصلی کاهش بازده جذب است. این نتایج مشابه نتایج بدست آمده توسط کانگ و همکارانش می‌باشد [32]. نکته‌ای که در این میان قابل توجه است افزایش شار جذب CO_2 به ازای افزایش دبی گاز می‌باشد. در این مورد می‌توان گفت که غلظت CO_2 موجود در فصل مشترک گاز-مایع، با افزایش دبی گاز، افزایش یافته و این امر منجر به افزایش انتقال جرم CO_2 از میان غشا شده است. از سوی دیگر، با دقت در شکل می‌توان دریافت که در دبی‌های پایین گاز، بازده جذب غشای خالص و نانوکامپوزیتی اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند ولی به تدریج با افزایش دبی گاز، غشای خالص افت زیادی را نسبت به گونه دیگر از خود نشان داده است. در این مورد می‌توان گفت که چون عملیات جذب در سرعت بالای جاذب (200 ml/min) صورت گرفته است لذا در این شرایط احتمال خیس شدن غشاها زیاد بوده است. در نتیجه، غشاهایی که قدرت آبریزی پایین‌تری دارند، بیشتر در معرض خیس‌شدگی قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر با توجه به اینکه، در دبی‌های بالای گاز، زمان اقامت بسیار کوتاه‌تر می‌گردد لذا غشاهایی که در معرض خیس‌شدگی قرار گرفته‌اند، افت زیادی را در راندمان جذب CO_2 از خود نشان می‌دهند. از این رو، غشای نانوکامپوزیتی به دلیل داشتن بیشترین قدرت آبریزی، کمترین میزان خیس‌شدگی و در نتیجه کمترین میزان افت را از خود نشان داده‌اند.

جدول 5- تخلخل سطحی مؤثر و اندازه متوسط حفرات غشاها

غشا	تخلخل سطحی مؤثر (m^{-1})	اندازه متوسط حفرات (μm)
خالص	256/4	0/286
نانوکامپوزیتی	268/5	0/197

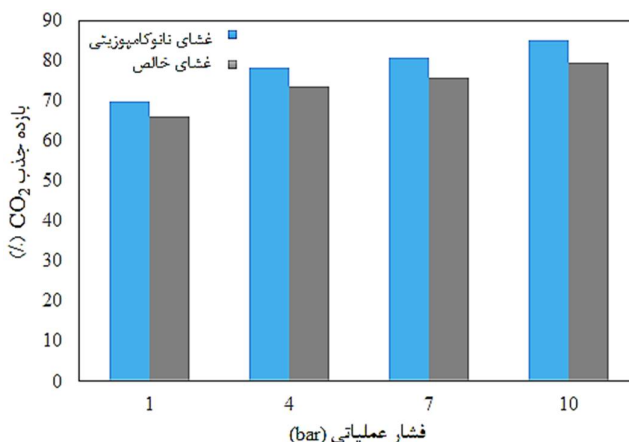
شکل 7- نمودار بازده جذب CO_2 بر حسب سرعت گاز (سرعت جاذب = 200 ml/min و فشار عملیاتی = $1/5 \text{ bar}$)



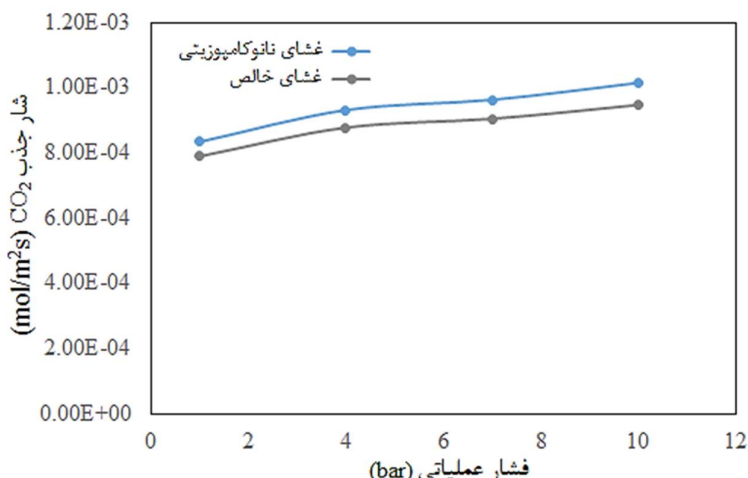
شکل 8- نمودار شار جذب CO₂ بر حسب شدت جریان گاز (سرعت جاذب = 200 ml/min و فشار عملیاتی = 1/5 bar)

3-4-2- بررسی اثر فشار عملیاتی

با توجه به اینکه فشار عملیاتی یکی از پارامترهای مهم در عملیات جذب CO₂ توسط تماس دهنده‌های غشایی می‌باشد، بنابراین در این بخش اثر پارامتر فشار بر روی بازده و شار جذب CO₂ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل در شکل 9 و 10 نشان داده شده است. با دقت در این شکل‌ها می‌توان دریافت که با افزایش فشار عملیاتی، شار جذب CO₂ و بازده آن افزایش یافته است. این نتایج مشابه نتایج بدست آمده توسط آقای مرزوقی و همکاران است [31]. در حالت کلی افزایش بازده جذب CO₂ به ازای افزایش فشار عملیاتی را می‌توان به دو عامل مهم ارتباط داد که عبارتند از: (الف) افزایش فشار عملیاتی منجر به افزایش فشار جزئی CO₂ شده که در پی آن غلظت CO₂ در سطح مشترک گاز- مایع افزایش یافته و در نتیجه مقدار بیشتری از گاز CO₂ با مایع جاذب در تماس بوده و می‌تواند توسط این مایع جذب گردد؛ (ب) حجم گاز با افزایش فشار عملیاتی متراکم‌تر می‌گردد. از سوی دیگر با توجه به اینکه نرخ جریان فاز گاز در طول عملیات ثابت در نظر گرفته شده است بنابراین، زمان اقامت فاز گاز در داخل تماس دهنده‌های غشایی به تاخیر افتاده که این امر باعث حذف بهتر CO₂ می‌گردد [32]. نکته دیگری که در اینجا حائز اهمیت است، مقاومت مکانیکی بالای غشاها می‌باشد. بطوریکه با وجود اعمال فشار عملیاتی بالا در تماس دهنده‌ها، غشاها موجود در آن‌ها همچنان مقاومت مکانیکی خود را حفظ کرده و دچار پارگی نشده‌اند.



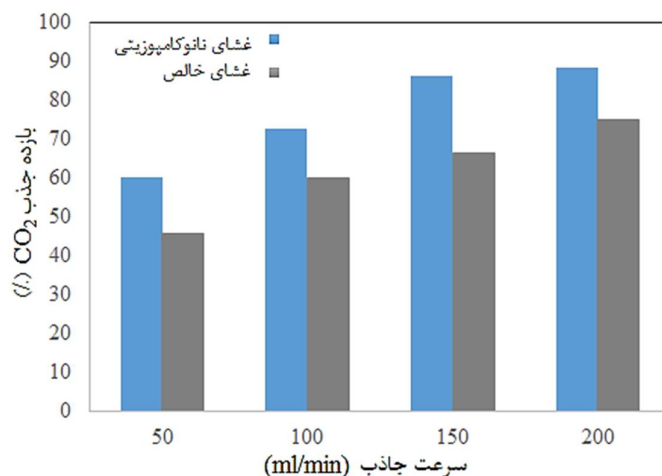
شکل 9- نمودار بازده جذب CO₂ بر حسب فشار عملیاتی (سرعت گاز = 100 ml/min و سرعت جاذب = 100 ml/min)



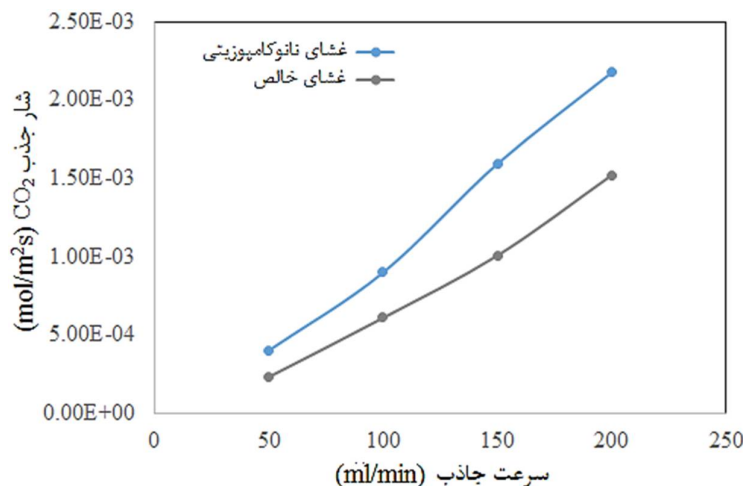
شکل 10- نمودار شار جذب CO₂ بر حسب فشار عملیاتی (سرعت گاز = 100 ml/min و سرعت جاذب = 100 ml/min)

3-4-3- بررسی اثر سرعت جاذب

شکل 11 اثر سرعت مایع جاذب بر روی بازده جذب CO₂ و شکل 12 اثر این پارامتر را بر روی شار جذب CO₂ نشان می‌دهد. با دقت در این شکل می‌توان دریافت که با افزایش سرعت مایع جاذب، بازده جذب افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به افزایش ضریب انتقال جرم (k_1) به واسطه افزایش سرعت مایع (بر اساس رابطه $\frac{Vd_i^2}{DL} = 1.62$ که در آن $sh = \frac{k_1 d_i}{D}$ سرعت مایع جاذب است) نسبت داد [33-35]. از سوی دیگر با دقت در شکل 12 می‌توان دریافت که شار جذب CO₂ در سرعت‌های پایین جاذب (100 (ml/min) تا 50 (ml/min)) برای هر دو گونه غشایی نزدیک به هم می‌باشد ولی به تدریج با افزایش سرعت جاذب، اختلاف شار جذب CO₂ برای غشای خالص و نانوکامپوزیتی افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به قدرت آگریزی بالای غشاهای نانوکامپوزیتی نسبت داد که به موجب آن، حفرات این نوع غشا در عملیات جذب با سرعت‌های بالای جاذب، خیس نمی‌شوند و یا خیس‌شدگی جزئی در آن‌ها اتفاق می‌افتد. در صورتیکه، در غشای خالص در سرعت‌های بالای جاذب، به واسطه قدرت آگریزی کم‌تر، احتمال پدیده خیس‌شدگی غشا زیاد است. همچنین با دقت در نمودار شکل 11 می‌توان دریافت که در سرعت جاذب 200 (ml/min)، غشای نانوکامپوزیتی بیشترین بازده جذب CO₂ (88%) را دارا می‌باشد. مسأله مهم در این میان، ساخت غشاهای الیاف توخالی، با قیمت پایین و با قابلیت بالاست که همین مسأله امکان توسعه فناوری غشایی را در زمینه تصفیه گاز فراهم نموده است. لذا در کار حاضر، بحث تعدیل قیمت و بهبود خواص غشاها از اولویت بسزایی برخوردار بوده و نیل به آن می‌تواند گام موثری در رابطه با گسترش فناوری غشایی در زمینه تصفیه گاز دودکش خروجی از کارخانه‌های سیمان حاصل نماید.



شکل 11- نمودار بازده جذب CO₂ بر حسب سرعت جاذب (سرعت گاز = 100 ml/min و فشار عملیاتی = 1/5 bar)



شکل 12- نمودار شار جذب CO₂ بر حسب سرعت جاذب (سرعت گاز = 100 ml/min و فشار عملیاتی = 1/5 bar)

5-3- مقایسه بازده جذب CO₂ فرایندهای غشایی مختلف

جدول 6 خلاصه‌ای از بازده جذب CO₂ با استفاده از فرایندهای غشایی مختلف را نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر موجود در جدول نشان می‌دهد که فناوری تماس دهنده‌های موجود در این تحقیق بازده عملیاتی تقریباً مشابهی با فرایندهای غشایی دیگر از خود نشان می‌دهند. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که غشای کامپوزیتی PVC/CaCO₃ می‌تواند به عنوان یک غشای مناسب در فرایند جذب CO₂ در یک تماس دهنده غشایی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول 6- بازده جذب CO₂ با استفاده از فرایندهای غشایی مختلف CO₂

مرجع	محل کاربرد	جز مولی CO ₂	بازده جذب CO ₂	فرایند غشایی
[4]	کارخانه سیمان	0/22	90	فناوری مایع‌سازی CO ₂ با کمک غشا
[13]	کارخانه سیمان	0/2	95	غشای جذب گاز چند مرحله‌ای
[36]	گاز دودکش فرضی	0/1	90	انتقال تسهیل یافته
[18]	نیروگاه ذغال سنگ	0/123	90	تماس دهنده‌های غشایی الیاف توخالی
[17]	گاز دودکش فرضی	6/16-4/6	91/3	تماس دهنده‌های غشایی الیاف توخالی
	پژوهش حاضر	0/22	88	تماس دهنده‌های غشایی الیاف توخالی

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی PVC حاوی نانوذرات CaCO_3 ساخته شده و سپس در یک سامانه تماس‌دهنده غشایی جهت جذب گاز CO_2 خروجی از گاز دودکش یک کارخانه سیمان مرجع، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تصاویر SEM حاکی از وجود نانوذرات بر روی سطح غشاهای نانوکامپوزیتی و همچنین در ساختار داخلی آن‌ها بود. همچنین این تصاویر نشان دادند که گستردگی در توزیع نانوذرات عاملی بر افزایش زبری سطح بوده که افزایش زبری سطح نیز منجر به افزایش زاویه تماس غشاهای نانوکامپوزیتی نسبت به غشاهای خالص شد. در تحقیق حاضر، به منظور جداسازی CO_2 ، خوراک گازی با ترکیبی مشابه با ترکیب درصد گاز دودکش یک کارخانه سیمان مرجع، به داخل غشاهای الیاف توخالی تزریق شد تا اثر سرعت گاز، سرعت جاذب و فشار عملیاتی بر روی میزان جذب CO_2 مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که افزایش سرعت گاز تأثیر منفی بر روی بازده جذب داشته، ولی در مقابل، افزایش فشار عملیاتی و سرعت جاذب بازده جذب را افزایش دادند. شایان ذکر است که کار اخیر، به صورت آزمایشگاهی انجام پذیرفت و نتایج حاصل بهبود قابل توجهی را در زمینه حذف CO_2 نشان داد. لذا با گسترش این کار در فاز صنعتی، می‌توان با استفاده از فناوری‌های غشایی در زمینه تصفیه گاز دودکش خروجی از کارخانه‌های سیمان گام موثری برداشت.

5- قدردانی

در این کار تحقیقی از بخش محیط زیست کارخانه سیمان بهبهان، تقدیر و تشکر می‌گردد.

6- منابع

- [1] A.B. Avagyan, "Theory of bioenergy accumulation and transformation: application to evolution, energy, sustainable development, climate change, manufacturing, agriculture, military activity and pandemic challenges", *Athens J Sci*, vol. 8(1), pp. 57-80, 2021.
- [2] S.C. Galusnyak. L. Petrescu. C.-C. Cormos, "Environmental impact assessment of post-combustion CO_2 capture technologies applied to cement production plants", *Journal of Environmental Management*, vol. 320, pp. 115908, 2022.
- [3] S.O. Gardarsdottir. E. De Lena. M. Romano. S. Roussanaly. M. Voldsund. J.-F. Pérez-Calvo. D. Berstad. C. Fu, R. Anantharaman. D. Sutter, "Comparison of technologies for CO_2 capture from cement production—Part 2: Cost analysis", *Energies*, vol. 12(3), pp. 542, 2019.
- [4] M. Voldsund. S.O. Gardarsdottir. E. De Lena. J.-F. Pérez-Calvo. A. Jamali. D. Berstad. C. Fu, M. Romano. S. Roussanaly. R. Anantharaman, "Comparison of technologies for CO_2 capture from cement production—Part 1: Technical evaluation", *Energies*, vol. 12(3), pp. 559, 2019.
- [5] X. Liang. J. Li, "Assessing the value of retrofitting cement plants for carbon capture: A case study of a cement plant in Guangdong", *China, Energy Conversion and Management*, vol. 64, pp.454-465, 2012.
- [6] K. Koring. V. Hoenig. H. Hoppe. J. Horsh. C. Suchak. V. Llevenz. B. Emberger, "Deployment of CCS in the Cement Industry", *IEA Report*, vol. 19, 2013.
- [7] S. Roussanaly. C. Fu. M. Voldsund. R. Anantharaman. M. Spinelli. M. Romano, "Techno-economic analysis of MEA CO_2 capture from a cement kiln—impact of steam supply scenario", *Energy Procedia*, vol. 114, pp. 6229-6239, 2017.
- [8] J. Du, W. Yang. L. Xu. L. Bei. S. Lei. W. Li. H. Liu. B. Wang. L. Sun, "Review on post-combustion CO_2 capture by amine blended solvents and aqueous ammonia", *Chemical Engineering Journal*, vol. 488, pp.150954, 2024.
- [9] D.C. Ozcan, "Techno-economic study of the calcium looping process for CO_2 capture from cement and biomass power plants", 2014.

- [10] N. Rodríguez. R. Murillo. J.C. Abanades, "CO₂ capture from cement plants using oxyfired precalcination and/or calcium looping", *Environmental science & technology*, vol. 46(4), pp. 2460-2466, 2012.
- [11] M. Diego. B. Arias. J. Abanades, "Analysis of a double calcium loop process configuration for CO₂ capture in cement plants", *Journal of Cleaner Production*, vol. 117, pp. 110-121, 2016.
- [12] H. Gerbelová. M. Van Der Spek. W. Schakel, "Feasibility assessment of CO₂ capture retrofitted to an existing cement plant: post-combustion vs. oxy-fuel combustion technology", *Energy Procedia*, vol. 114, pp. 6141-6149, 2017.
- [13] K. Lindqvist. S. Roussanaly. R. Anantharaman, "Multi-stage membrane processes for CO₂ capture from cement industry", *Energy Procedia*, vol. 63, pp. 6476-6483, 2014.
- [14] A. Shiravi. M.S. Maleh. A. Raisi. M. Sillanpää, "Hollow fiber membrane contactor for CO₂ capture: A review of recent progress on membrane materials, operational challenges, scale-up and economics", *Carbon Capture Science & Technology*, vol. 10, pp. 100160, 2024.
- [15] S.C. Mamah. P.S. Goh. A.F. Ismail. B.C. Ng. M.S. Abdullah. N.A. Ahmad. M.H. Hazaraimi. A.M. Tamidi, "Advancement in modification of polyvinylidene flouride hollow fiber membrane contactors for CO₂ capture", *Emergent Materials*, pp. 1-25, 2025.
- [16] R. Ramezani. L. Di Felice. F. Gallucci, "A review on hollow fiber membrane contactors for carbon capture: Recent advances and future challenges", *Processes*, vol. 10(10), pp. 2103, 2022.
- [17] S. Li, T.J. Pyrzyński, N.B. Klinghoffer, T. Tamale, Y. Zhong, J.L. Aderhold, S.J. Zhou, H.S. Meyer, Y. Ding, B. Bikson, "Scale-up of PEEK hollow fiber membrane contactor for post-combustion CO₂ capture", *Journal of Membrane Science*, vol. 527, pp. 92-101, 2017.
- [18] C.A. Scholes, S.E. Kentish, A. Qader, "Membrane gas-solvent contactor pilot plant trials for post-combustion CO₂ capture", *Separation and Purification Technology*, vol. 237, pp. 116470, 2020.
- [19] P. Amirabedi. A. Akbari. R. Yegani. S. Raveshiyan, "CO₂ stripping from monoethanolamine through a polypropylene/CH₃SiO₂ composite hollow-fiber membrane contactor", *Chemical Engineering & Technology*, vol. 45(8), pp. 1512-1521, 2022.
- [20] S. Raveshiyan. P. Amirabedi. R. Yegani. B. Pourabbas. A. Tavakoli, "CO₂ absorption through PP/fSiO₂ nanocomposite hollow fiber membrane contactor", *Polyolefins Journal*, vol. 9(1), pp. 61-71, 2022.
- [21] S. Hashemifard. M. Ghodrati. M. Rezaei. A. Izadpanah, "Experimental study of gas dehydration via PDMS/CaCO₃ NP-coated PVC hollow fiber membrane contactor", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 162, pp. 62-73, 2020.
- [22] F. Javadi. B. Mohammadi-Alasti. M. Amirabedi. S. Raveshiyan. P. Amirabedi, "Investigating the influence of CaCO₃ nanoparticles on the performance of CO₂ absorption in the PVC membrane contactors", *Chemical Engineering Communications*, vol. 212(1), pp. 64-74, 2025.
- [23] D. Kalmykov, S. Shirokikh, A. Tsoy, S. Legkov, A. Yushkin, T. Anokhina, S. Bazhenov, "Oxygen removal with composite membrane contactors to prevent amine solvent degradation in post-combustion CO₂ capture: A comprehensive parametric study", *Journal of Membrane Science*, vol. 717, pp. 123611, 2025.
- [24] H. Pang. Y. Qiu. W. Sheng, "Long-term stability of PVDF-SiO₂-HDTMS composite hollow fiber membrane for carbon dioxide absorption in gas-liquid contacting process", *Scientific Reports*, vol. 13(1), pp. 5531, 2023.
- [25] E. Deng. V. Bui. F. Pazanialenjareghi. S. Das. H. Lin, "Polydimethylsiloxane nanofilm-enhanced membrane contactors for CO₂ capture", *Separation and Purification Technology*, pp. 135713, 2025.
- [26] M. Fosi-Kofal. A. Mustafa. A.F. Ismail. M. Rezaei-DashtArzhandi. T. Matsuura, "PVDF/CaCO₃ composite hollow fiber membrane for CO₂ absorption in gas-liquid membrane contactor", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 31, pp. 428-436, 2016.

- [27] Li, J., et al., *CaCO₃/TiO₂ Nanoparticle Co-Blended Modified Forward Osmosis Membrane: Achieving Efficient and Stable Oil-Water Separation*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025: pp. 137655.
- [28] G. Bakeri, A. Ismail, D. Rana, T. Matsuura, M. Shariaty, "Investigation on the effects of fabrication parameters on the structure and properties of surface-modified membranes using response surface methodology", *Journal of applied polymer science*, vol. 123(5), pp. 2812-2827, 2012.
- [29] X. Yu. L. An, J. Yang. S.-T. Tu. J. Yan, "CO₂ capture using a superhydrophobic ceramic membrane contactor", *Journal of Membrane Science*, vol. 496, pp. 1-12, 2015.
- [30] N.A. Rahim, N. Ghasem, M. Al-Marzouqi, "Absorption of CO₂ from natural gas using different amino acid salt solutions and regeneration using hollow fiber membrane contactors", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 26, pp. 108-117, 2015.
- [31] S.A. Marzouk. M.H. Al-Marzouqi. M.H. El-Naas. N. Abdullatif. Z.M. Ismail, "Removal of carbon dioxide from pressurized CO₂-CH₄ gas mixture using hollow fiber membrane contactors", *Journal of Membrane Science*, vol. 351(1-2), pp. 21-27, 2010.
- [32] G. Kang. Z.P. Chan. S.B.M. Saleh. Y. Cao, "Removal of high concentration CO₂ from natural gas using high pressure membrane contactors", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 60, pp. 1-9, 2017.
- [33] P. Kumar. J. Hogendoorn. P. Feron. G. Versteeg, "New absorption liquids for the removal of CO₂ from dilute gas streams using membrane contactors", *Chemical Engineering Science*, vol. 57(9), pp. 1639-1651, 2002.
- [34] S.-J. Kim. A. Park. S.-E. Nam. Y.-I. Park. P.S. Lee, "Practical designs of membrane contactors and their performances in CO₂/CH₄ separation", *Chemical Engineering Science*, vol. 155, pp. 239-247, 2016.
- [35] P. Amirabedi. R. Yegani. A.H. Hesaraki, "Hydrophobicity optimization of polypropylene hollow fiber membrane by sol-gel process for CO₂ absorption in gas-liquid membrane contactor using response surface methodology", *Iranian Polymer Journal*, vol. 26(6), pp. 431-443, 2017.
- [36] A. Hussain, M.-B. Hägg, "A feasibility study of CO₂ capture from flue gas by a facilitated transport membrane", *Journal of Membrane Science*, vol. 359(1), pp. 140-148, 2010.